AO

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

le titre de Docteur-ingénieur

par

Monsieur CARPENTIER Guy

1re THÈSE

PHOTOGRAPHIES DU SOLEIL A HAUTE RÉSOLUTION A 2000 Å

2e THÈSE

Propositions données par la Faculté

RECONNAISSANCE DES FORMES

Soutenues le 23 juin 1967 devant la Commission d'examen

Président : M. FRANCON

Examinateurs : MM. BLAMONT, RÖSCH.

AO

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

le titre de Docteur-ingénieur

par

Monsieur CARPENTIER Guy

1re THÈSE

PHOTOGRAPHIES DU SOLEIL A HAUTE RÉSOLUTION A 2000 Å

2e THÈSE

Propositions données par la Faculté

RECONNAISSANCE DES FORMES

Soutenues le 23 juin 1967 devant la Commission d'examen

Président : M. FRANCON
Examinateurs : MM. BLAMONT, RÖSCH.

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

PHOTOGRAPHIES DU SOLEIL A HAUTE RÉSOLUTION A 2000 Å

par J.-E. BLAMONT et G. CARPENTIER

Service d'Aéronomie, C.N.R.S.,
91 - Verrières-le-Buisson.

SOMMAIRE. — *Il existe, à 30 000 m d'altitude, une fenêtre atmosphérique située entre les bandes d'absorption de l'ozone et celles de l'oxygène. Ceci nous a permis, en ballon stratosphérique à l'aide d'un télescope de 20 cm, de prendre des photographies du Soleil à 2000 Å. Notre appareil est installé à bord d'une nacelle stabilisée suivant trois axes. La stabilité de la nacelle est meilleure que 1″ pendant des temps inférieurs au 1/4 de seconde.*

Le télescope, de type Cassegrain, ouvert à f/40 et ayant une focale équivalente de 8 m, a une résolution angulaire en laboratoire meilleure que 0,5″. L'intervalle spectral est de 125 Å; il est défini par 2 filtres interférentiels centrés à 2000 Å. Le champ de l'appareil est de 7′.

A l'altitude de 30,5 km, nous avons obtenu 7 cycles de 7 photographies de temps de pose compris entre 1/4 et 1/250e de seconde. Le temps de pose ayant donné le meilleur noircissement est le 1/4 de seconde. Parmi les photographies au 1/4 de seconde, la première a une résolution angulaire meilleure que celle des suivantes. Cette résolution semble être de l'ordre de 1″.

Nous pouvons observer des éléments brillants que nous reconnaissons sur tous les clichés, de dimensions inférieures à 10″, de durée de vie supérieure à 25 minutes. Nous pensons que ces éléments sont des microfacules chromosphériques. Les plus brillantes que nous ayons photographiées correspondent à un accroissement de température de 300 ± 100°K.

Nous pouvons également détecter sur le premier cliché une granulation qui semble analogue à celle vue dans le visible, mais correspondant à des écarts de température mesurés inférieurs (60 ± 5°K). Cette granulation est trop fine pour être observée sur les photographies suivantes.

Cette granulation est détectée grâce à des mesures densitométriques, en faisant une statistique sur de nombreux granules : on mesure la corrélation entre l'intensité d'un point du Soleil et l'intensité d'un point distant de j secondes d'arc.

Nous avons également pu établir que le contraste des granules tendait vers 0 sur le bord du disque solaire.

La distance maximum de corrélation est inférieure à 2″ pour une partie des enregistrements (granulation seule); pour l'autre partie, nous la mesurons de 4″ (granulation plus microfacules).

ABSTRACT. — *At 100 000 ft. there exists an atmospheric window located between the absorption bands of ozone and molecular oxygen. By using a stratospheric balloon with a 20 cm. telescope, photographs of the sun at 2000 Å were obtained. The telescope was installed aboard a gondola stabilized along 3 axes, the local vertical and two perpendicular axes given by the sun. The stability of the gondola is better than 1″ for exposure times of 1/4 s. or less.*

The f/40 Cassegrain type telescope with equivalent focal length of 8 meters has an angular resolution of better than 0.5″ under laboratory conditions. The bandwidth given by two interference filters is 125 Å. They are centered at 2000 Å, which is the wavelength of the maximum of transmission at the center of the atmospheric window. The angular field of the instrument is 7′. An Eastman Kodak film 103 aO-UV was used.

With a payload of 450 lbs. the balloon attained an altitude of 30.5 km. During 25 mins. of fine pointing we obtained 7 series of 7 photographs with exposure times of between 1/4 s. and 1/250 s. The best results were obtained at 1/4 s. (d=0.8 above gross fog). Photographs taken at 1/8 s. were underexposed but still usable. Among the photographs with 1/4 s. exposure the first one has a better angular resolution than the others. It appears to be 1″.

Certain bright elements appear on all of the films. Their dimensions are under 10″, and their lifetime exceeds 25 mins. We think that these elements are chromospheric microfacules. The brightest which were photographed correspond to an increase in temperature of 300 ± 100°K.

On the first film we also find a granulation which seems to be analogous to that which is seen in the visible spectrum. But our measurements indicate smaller variations in temperature (60 ± 5°K). This granulation is too fine to be detected on the other photos.

In order to do a quantitative analysis of this granulation, we have made densitometric recordings of our first plate as well as those for a plate uniformly exposed to the same degree and at the same wavelength.

Rectilinear sweeps were made parallel to the solar limb, with a rectangular „analytical slit" which corresponds, on the sun, to 0,5 × 1″ (1″ perpendicular to the direction of the sweep). From these densitograms we have calculated the correlation function F (j) and structure function S (j) for our image of the sun and for the granulation of the film.

$$F(j) = \frac{\overline{(I_k - M)(I_{k+j} - M)}}{\overline{(I_k - M)^2}}$$

$$S(j) = \frac{\overline{(I_k - I_{k+j})^2}}{\overline{I_k^2}}$$

where I_k is the luminous intensity of each of N measured points which sensitized the film at point K, I_{k+j} is the intensity at point J at j distance from K, and where:

$$M = \overline{\frac{I_k}{N}}.$$

The functions F (j) and S (j) are related as follows:

$$\overline{(I_k - M)^2} \times F(j) = \frac{\overline{I_k^2}}{2} \times [S(j = \infty) - S(j)]$$

We also have the relationship:

$$S(j) = S_s(j) + S_g(j)$$

where S (j), S_s (j) and S_g (j) are respectively the structure function of the image of the sun, of the sun itself and of a uniformly illuminated plate (grain of the film).

An examination of the structure functions calculated from 8 recordings of 1′ of arc on the sun, and 15 recordings of 2′ of arc permitted us to measure the R.M.S. deviation of the observed temperatures. We were also able to establish that this R.M.S. deviation approached zero on the solar limb.

The maximum distance of correlation is less than 2″ of arc for part of the recordings (granulation alone); for the other part we measure it at 4″ (granulation plus microfacules).

Introduction

Depuis quelques années, le domaine spectral des observations du Soleil ne se limite plus au rayonnement transmis par l'atmosphère : il est possible à l'aide de ballons, de fusées ou de satellites de s'affranchir de l'absorption atmosphérique partiellement ou totalement. En particulier, le domaine des longueurs d'onde inférieures à 3000 Å peut être étudié. Nous avons poursuivi depuis plusieurs années, au Service d'Aéronomie, la mise au point d'expériences destinées à l'étude de l'émission ultraviolette du Soleil jusqu'à 1800 Å.

L'observation à haute résolution, à partir du sol, est particulièrement gênée par la turbulence atmosphérique qui limite la résolution angulaire. En s'élevant dans l'atmosphère, il est possible d'augmenter cette résolution. Les résultats obtenus du sommet d'une montagne sont déjà intéressants. Les expérimentateurs de Stratoscope II, pour les mêmes raisons, placent leur instrument à plus de 20 kilomètres d'altitude avec un ballon stratosphérique.

Nous avons obtenu des photographies monochromatiques du Soleil à 2000 Å, avec un télescope de 20 centimètres de diamètre. Ce télescope est installé à bord d'une nacelle stabilisée, visant le Soleil, emportée à 30 000 mètres d'altitude par un ballon stratosphérique.

Cette région spectrale correspond au minimum de température de l'atmosphère solaire et à τ_{5000} de l'ordre de 0,005. La région observée, bien qu'étant très voisine de la chromosphère, est toujours considérée comme la photosphère.

Nous décrirons, en premier lieu, le dispositif expérimental. Dans une deuxième partie, nous exposerons les résultats obtenus.

Première partie

Description de l'expérience

I. Matériel mis a notre disposition

Sur un contrat du Centre National d'Études Spatiales, la Compagnie des Compteurs développe une nacelle stabilisée suspendue à un ballon stratosphérique [Bizouard *et al*, 1965 et 1966]. Cette nacelle, qui sans appareillage scientifique pèse 160 kg, permet d'emporter une charge utile de 40 à 50 kg. Notre expérience, installée à bord pour le premier vol, devait permettre de déterminer la précision de pointage qui devait être comprise entre 10 et 30″ sur les deux axes correspondant à la direction du Soleil, de 30′ sur le troisième axe, la verticale locale.

Comme les périodes d'oscillation ne sont pas inférieures à 10 s., il est possible d'obtenir une résolution de l'ordre de la seconde d'arc, si les temps de pose ne sont pas supérieurs à 0,5 s.

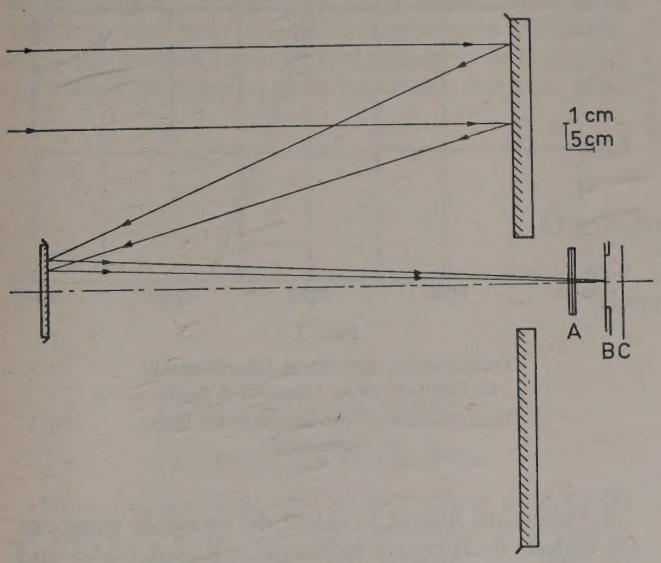

Fig. 1

Schéma de l'appareil en *A* : 2 filtres interférentiels,
en *B* : l'obturateur,
en *C* : le film.

Sketch of the instrument. *A* : 2 interference filters,
B : Shutter,
C : Film.

Le télescope conçu par J. Texereau, de l'Observatoire de Paris, est du type Cassegrain (fig. 1). Son miroir principal, parabolique, a un diamètre de 20 cm et une distance focale de 100 cm. Le miroir secondaire, hyperbolique, a un grandissement de 8,25. Les miroirs sont en silice fondue. La distance focale équivalente du télescope est de 8,25 m, donc son ouverture relative est f/40. Le diamètre du trou central est de 35 mm. Le champ angulaire sera donc toujours inférieur à 15′. Il sera ici de 7′. Le film devra être situé à 20 cm derrière le miroir principal.

Le diamètre théorique de la tache de diffraction d'un tel télescope est, à 2000 Å, de 0,25″. Nous avons pu observer, au laboratoire, dans le domaine visible, par autocollimation sur un excellent miroir plan, la tache de diffraction d'un point source. L'examen de cette tache nous a permis de juger que la surface d'onde à 5500 Å, après deux traversées du télescope, est meilleure que la tolérance de Rayleigh (écart à la surface d'onde idéale inférieur à $\lambda/4$). A 2000 Å, pour une seule traversée du télescope, nous sommes donc dans la tolérance de Rayleigh.

II. Dispositif expérimental

Les appareils prévus pour fonctionner aux conditions normales de température et de pression, étaient donc enfermés dans une boîte étanche située en arrière du télescope. La pression, à l'intérieur, demeurait la pression au niveau du sol. La température du caisson étanche reste égale à 20° C.

Outre le télescope, le matériel de l'expérience comprend les accessoires suivants :

— deux filtres interférentiels situés l'un derrière l'autre et dont le premier sert de hublot au caisson étanche ;

— l'appareil photographique, de marque Robot, automatique, muni d'un électro-aimant assurant le début de chaque temps de pose, et d'un moteur qui remonte le ressort armant l'appareil et avançant le film ;

— le programmeur qui déclenche les séquences de prises de vue ;

— un moteur qui a pour mission de changer les temps de pose ;

— un enregistreur papier « SFIM ».

Tous ces éléments sont contenus dans le caisson étanche. A l'extérieur sont placés :

— le rideau devant le télescope avec le moteur qui le fait fonctionner ;

— les batteries ;

— les ceintures chauffantes qui maintiennent le tube du télescope à 20° C.

II-1. *Choix de la longueur d'onde et des paramètres photographiques.*

Il existe une fenêtre atmosphérique entre l'absorption de l'ozone, centrée à 2500 Å, et l'absorption de

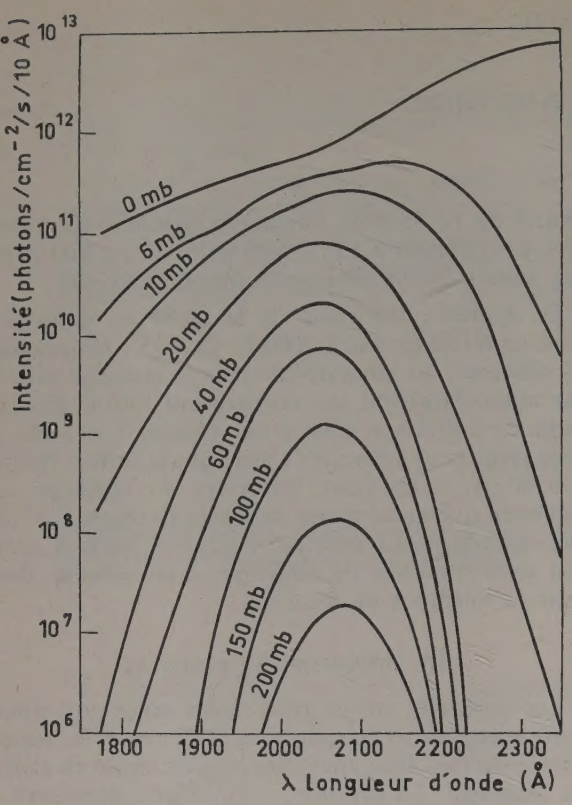

FIG. 2

Intensité du rayonnement solaire direct entre 1775 et 2300 Å calculée à neuf niveaux de pression d'après BREWER et WILSON (Représentation schématique). L'intensité est exprimée en photons/cm²/s/10 Å.

Intensity of the direct solar light between 1775 and 2300 Å calculated for 9 pressure levels by BREWER and WILSON (schematic representation). The intensity is expressed in photon/cm²/s/10 Å.

l'oxygène, en dessous de 2000 Å. La figure 2 représente l'intensité solaire disponible en fonction de l'altitude d'observation exprimée en millibars d'après BREWER et WILSON [1965]. On voit que, entre 1900 et 2100 Å, à 10 mb (30 km d'altitude), l'absorption atmosphérique de la lumière solaire est de l'ordre de 50 %. Par contre, au-dessous de 1800 Å et au-dessus de 2250 Å, l'énergie solaire transmise décroît très rapidement. Nous avons donc choisi comme longueur d'onde centrale, 2000 Å.

Les valeurs portées sur la figure ne sont qu'approchées car, parmi d'autres raisons, l'altitude de la couche d'ozone est variable. On exprime la transmission du rayonnement ultraviolet par la formule $T=10^{-kx}$ où k, fonction de la longueur d'onde, est le coefficient d'absorption décimal, et où x est la hauteur d'échelle exprimée en centimètres d'ozone, sous une pression de 1 atmosphère. La hauteur d'échelle de l'ozone au-dessus de 30 km est maximale l'été (0,06 cm) et minimale l'hiver (0,04 cm) [VIGROUX *et al*, 1965]. Elle est également plus élevée la nuit que le jour [CARVER *et al*, 1966].

Les éclairements sont calculés avec le Soleil au zénith. La transmission du filtre, par suite de l'absence de films sensibles en U.V. et non sensibles dans le visible, doit être 10^6 fois plus faible dans le visible qu'à son maximum de transmission. Nous avons placé deux filtres en série (fig. 3). L'ensemble est équivalent à un filtre dont le maximum de transmission est de 3 % et la largeur de bande à mi-hauteur de 125 Å.

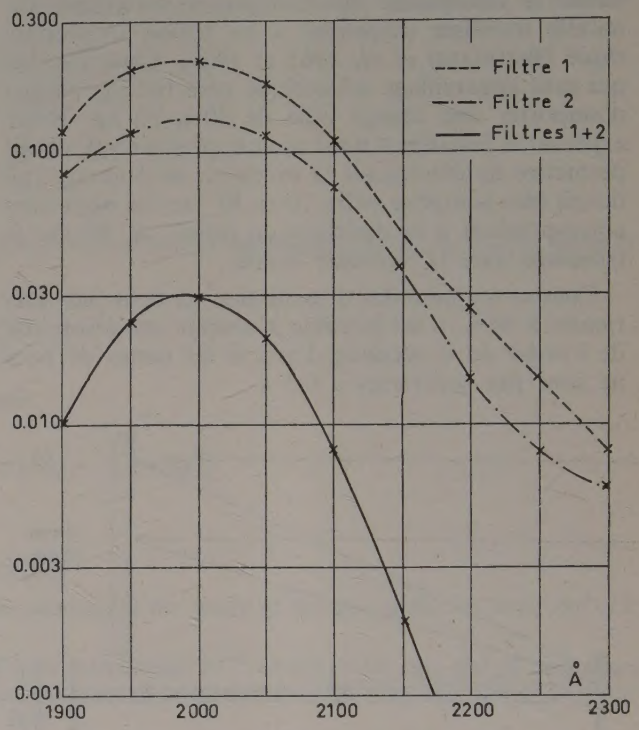

FIG. 3

Transmission des filtres interférentiels en fonction de la longueur d'onde.

Transmission of the interference filters vs. wavelength.

Le choix du film et le calcul du temps de pose ont été déduits de la notice technique « Kodak plates and films for Science and Industry » et des travaux de FOWLER, RENSE et SIMMONS [1965]. Le film utilisé est du film 35 mm 103 a O-UV. Le temps de pose calculé est de 1/16 de seconde. Les temps de pose de l'expérience sont au nombre de 7, compris entre 1/4 et 1/250 de seconde. Une photographie est prise toutes les 30 secondes. On retrouvera donc un même temps de pose toutes les 3 m 30 s.

Nous sommes certains que les photographies prises lors du vol ont été impressionnées par de la lumière ultraviolette, pour quatre raisons :

1° Avant le vol, nous avons éclairé un photomultiplicateur R.C.A. 7200 à fenêtre en silice fondue, que nous avions installé à la place de l'appareil photographique, derrière les deux filtres interférentiels,

à l'aide d'une lampe à xénon OSRAM haute pression type XBO.

Le signal obtenu avec interposition sur le faisceau d'une lame de verre en borosilicate crown, était cent fois plus faible qu'en l'absence de lame ;

2° Lors du vol, le temps de pose correct était supérieur à celui calculé théoriquement comme nous le verrons par la suite ;

3° La lumière parasite due à des « piqûres » donne un voile pratiquement uniforme comme nous l'avons vérifié récemment ;

4° Après le vol, du sol, nous avons, exactement dans les conditions de l'expérience, exposé un film identique en photographiant le Soleil. Une pose de 25 minutes laissa le film entièrement vierge, alors que les photographies que nous publions ont un temps de pose de 0,25 seconde.

II-2. *Problèmes thermiques.*

Pour obtenir une résolution angulaire de l'ordre de la seconde d'arc, les miroirs ne doivent pas se déformer sous l'influence du rayonnement solaire. Devant le télescope a été placé un rideau qui se ferme entre chaque photographie. Son déplacement, bien que trop lent pour annuler complètement l'échauffement des miroirs, perturbe la stabilisation de la nacelle. La vitesse du dépointage de l'appareil, due à cet effet, changeant de signe au moment de la prise de la photographie (changement de sens de déplacement du rideau), l'effet de « bougé » n'est donc pas trop à craindre.

D'autre part, la température du tube du télescope doit rester constante : si le télescope est réglé pour une température donnée, la résolution se dégradera de 1″ pour une variation de température du tube de 1° C. Le tube est donc chauffé et maintenu à la température constante de 20° C $\pm$ 0.5° C. La température du tube est transmise au sol par télémesure.

III. Déroulement du vol

Le lâcher du ballon a eu lieu à Aire-sur-Adour (Landes), au Centre de Lancements de Ballons du Centre National d'Études Spatiales, le 2 mai 1966 à 9 h 50 locale. Les photographies ont été prises depuis 11 h 09 jusqu'à 11 h 34 TU.

Les dépouillements de la télémesure ont montré l'évolution de la température du tube du télescope. La précision de la température donnée par la télémesure est de l'ordre de 2° C. Pendant toute l'expérience, la température s'est maintenue constante, indiquant une température d'équilibre très voisine de 20° C. Nous n'avons donc vraisemblablement pas eu de balayage de la mise au point par le jeu des dilatations.

Deuxième partie

Résultats

I. Photographies obtenues

I-1. *Aspect des photographies.*

Nous avons obtenu des photographies de 8 cycles de temps de pose. Les huit photographies d'exposition convenable (densité=0,8 au-dessus du fond de plaque), ont été obtenues pour les temps de pose les plus longs : 0,25 s. Nous pouvons voir, sur les planches I et II, les tirages de la première et de la seconde photographie prises avec ce temps de pose. Les photographies posées pendant 1/8 de seconde sont légèrement sous-exposées (densité=0,5 au-dessus du fond de plaque). Celles au 1/16^e de seconde sont discernables, mais très sous-exposées. La surface du Soleil observable est deux fois plus petite que prévu, car le point visé par le télescope était distant de 2′ d'arc du point prévu, les dépointages dus au rideau ayant été moins importants que lors des essais au sol : 1/3 seulement du champ de l'appareil est couvert par le Soleil au lieu de 2/3, comme il avait été prévu.

Un halo de lumière parasite, centré sur le centre du champ de l'appareil apparaît, avec un noircissement correspondant à une intensité lumineuse quatre fois plus faible que la lumière incidente. Cette lumière parasite nous semble provenir de réflexions de la partie du Soleil n'entrant pas dans le champ. Il apparaît également dans une partie du champ des franges dues vraisemblablement aux interférences d'un coin d'air entre les deux filtres interférentiels.

L'examen des photographies semble nous révéler l'existence de deux sortes de phénomènes différents. D'une part, des éléments brillants d'une taille et d'un contraste suffisants pour qu'ils puissent être reconnus sur toutes les photographies. Nous avons dénommé ces éléments brillants, des « microfacules chromosphériques ». En effet leur taille est petite : de quelques secondes à moins de 10 secondes. Dans notre article paru dans *Solar Physics* [Blamont et Carpentier, 1967] nous avons écrit que la taille de ces éléments était comprise entre 10″ et 20″ mais l'analyse photométrique des deux microfacules les plus brillantes de nos photographies comme nous le verrons § I - 3, nous a

révélé que la surface de brillance supérieure à la moitié de la brillance maximum était de l'ordre de 8 secondes carrées. D'autre part, pouvant être reconnus sur toutes les photographies, leur durée de vie est supérieure à 25 minutes, il ne semble donc pas que l'on puisse les assimiler à des granules observés dans le visible, particulièrement grands et brillants. Ces microfacules semblent souvent être associées entre elles.

D'autre part, on peut voir, surtout sur la première photographie dont la résolution angulaire est meilleure que celle des suivantes, une sorte de granulation dont les granules ont des dimensions bien inférieures. Ce phénomène ressemble à celui qui existe dans le visible.

I-2. *Sensitométrie du film et résolution angulaire obtenue.*

Les étalonnages photométriques faits avant le vol se sont révélés inexploitables. La caractéristique que nous utiliserons pour les dépouillements a été mesurée à partir du profil photométrique du bord solaire, obtenu sur les photographies de 1/4, 1/8 et 1/16e de seconde. Cette courbe n'est pas vraiment la caractéristique à temps de pose constant, mais la caractéristique à éclairement constant. Le γ de notre caractéristique est de 1.

Par la même occasion, nous avons obtenu le profil en brillance du bord solaire de la première photographie. Le spot analyseur sur le densitomètre correspond à $1'' \times 12''$ (fig. 4).

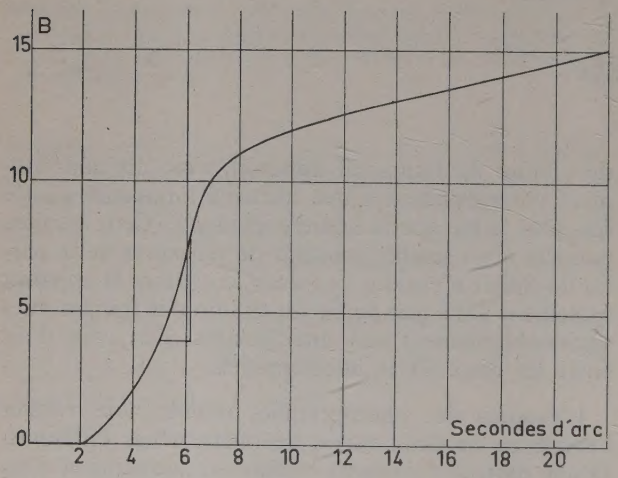

FIG. 4

Profil mesuré de la brillance du bord solaire.
Measured profile of the intensity of the solar limb.

Il apparaît sur cette figure que la pente de ce profil au voisinage du point d'inflexion est telle qu'un point de brillance B est distant du point de brillance $\frac{B}{2}$ de 1,3″. Nous pouvons donc affirmer que la résolution obtenue sur cette photographie, perpendiculairement au bord solaire est meilleure que 1,3″. Ceci est en effet une limite supérieure puisque nous intégrons sur 1″, et que d'autre part la décroissance réelle au voisinage du bord de la brillance du Soleil n'est pas infiniment rapide. Cette courbe d'ailleurs donne une limite inférieure à la pente de la décroissance réelle sur le bord du disque. Si l'on remplace la fente du densitomètre par une fente de 0,5″ de large, le bruit de l'enregistrement augmente et la précision de la mesure n'augmente pas.

Les courbes obtenues avec les sept autres photographies sont toutes identiques à la première. Ce résultat est apparemment en contradiction avec les examens visuels et photométriques.

Il nous faut donc penser qu'il s'est créé un astigmatisme qui conserve la netteté des droites parallèles au bord solaire, et qui rend « floues » les droites perpendiculaires.

L'astigmatisme que nous observons est certainement dû aux déformations asphériques du grand, mais surtout du petit miroir. En effet, ceux-ci sont éclairés beaucoup plus longtemps sur un bord que sur le bord diamétralement opposé, du fait du déplacement assez lent du rideau. De plus comme l'image du Soleil est décentrée sur le petit miroir, le barillet, support de celui-ci, peint en noir, absorbe beaucoup d'énergie et chauffe un bord de ce miroir avec lequel il a un bon contact thermique.

I-3. *Photométrie du groupe des deux microfacules les plus brillantes.*

Pour mieux connaître la résolution, nous avons tracé les isophotes du groupe des deux microfacules les plus brillantes qui sont visibles sur toutes les photographies bien qu'elles sortent progressivement du champ. En effet, si nous nous souvenons que le troisième axe de stabilisation de la nacelle est donné par un gyroscope, la rotation de la Terre sur elle-même a pour conséquence que l'image du Soleil tourne autour de son centre (direction visée par la nacelle). Sur la dernière photographie, ces microfacules sont au bord du champ de l'appareil.

Les isophotes de cette faible partie du champ ont été tracés à l'aide de notre microdensitomètre. La « fente » d'analyse est un carré de $40 \times 40\ \mu$ soit 1″ sur le Soleil. Des essais faits avec une fente de plus petite dimension donnent des résultats trop dispersés. Vingt balayages parallèles au bord solaire, de 25″ (1 mm) sur le cliché, distants les uns des autres de 0,6″ (25 μ) permettent de tracer les isophotes de la figure 5 où nous pouvons les voir, en trait plein pour la première photographie à 1/4 de seconde, en pointillé pour la photographie à 1/8 de seconde prise 30 secondes après. Les deux tracés concentriques correspondent, pour la surface la plus faible, à la brillance B au-dessus de la brillance moyenne B_m du Soleil au voisinage ; le tracé de plus grande surface

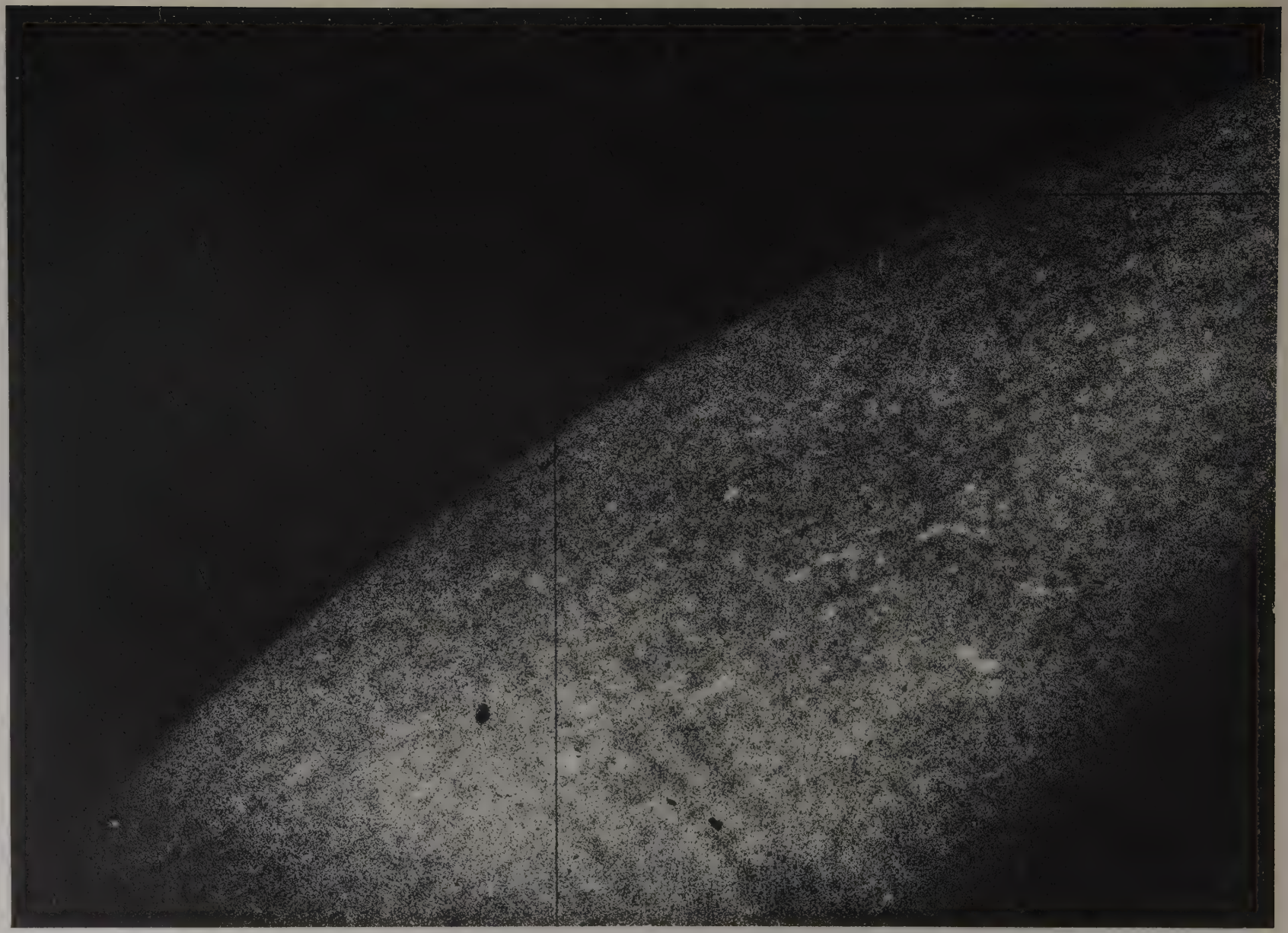

Planche I. — Photographie n° 1 : temps de pose 0,25 s -
2 mai 1966 11 h 09 T.U. (échelle : 1 mm 2,5″)

Planche II. — Photographie n° 2 : temps de pose 0,25 s - 2 mai 1966 11 h 13 T.U. (échelle : 1 mm = 2,5″)

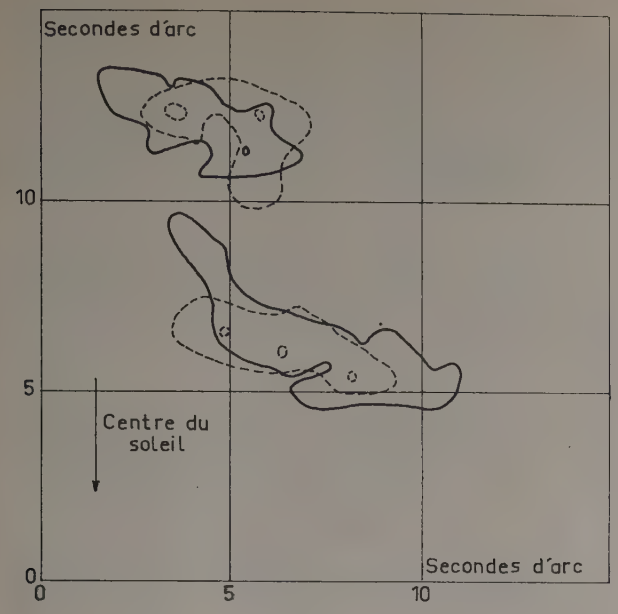

FIG. 5

Isophotes de 2 microfacules : en traits pleins la photo I prise à 1/4 s, en pointillés la photo I prise à 1/8 s. Ces deux photographies ont été prises à un intervalle de 30 secondes de temps.

Isophotes of 2 microfacules. Solid line photo N° 1 at 1/4 s exposure time ; dashed line photo N° 1 at 1/8 s exposure time. These 2 plates were taken at an interval of 30 s.

correspond à la brillance B/2 intermédiaire entre B et B_m.

Si nous considérons les isophotes obtenus à partir d'une même photographie, nous sommes amenés à penser que la résolution obtenue est très voisine de 1″. Mais, si nous superposons les tracés obtenus pour des photographies prises à 30 secondes d'intervalle (comme sur la figure 5) nous devons admettre que la « précision » de ces deux premiers clichés est plutôt voisine de 2″. Nous ne pensons pas en effet que l'aspect de ces microfacules ait eu le temps de se modifier entre les deux photographies. Les isophotes obtenus à partir de la deuxième photographie, avec un temps de pose de 1/4 de seconde montrent un tracé aussi dispersé.

La densité optique maximum de l'image de microfacules indique un écart de brillance sensiblement le même pour toutes les photographies. Cet écart est égal à $1{,}7 \pm 0{,}5$ fois la brillance moyenne du Soleil. En supposant, qu'à cette longueur d'onde, la température des couches photographiées est de 4500° K, et en assimilant le Soleil à un corps noir, nous avons calculé que l'écart de température maximum était de $300 \pm 100°$ pour ces éléments les plus brillants de nos clichés.

L'accroissement de l'intensité du Soleil dû à ces microfacules, par rapport à un Soleil qui en serait dépourvu est de l'ordre de quelques pour-cent dans le domaine de longueur d'onde considéré.

II. DÉPOUILLEMENTS PHOTOMÉTRIQUES DE LA GRANULATION

II-1. *Principe.*

Nous étudions, sur notre meilleur cliché, la corrélation existant entre la brillance de deux points voisins du Soleil, en fonction de leur distance.

Nous avons fait au microdensitomètre Vassy des enregistrements de l'intensité du disque sur la photographie N° 1 (temps de pose=0,25 s). Les passages sont rectilignes, aussi parallèles que possible au bord solaire, et de telle manière que les distances ainsi mesurées sur le cliché représentent des distances sur le Soleil indépendantes de la distance au centre μ.

Pour chacun de ces passages parallèles au bord, on peut calculer la fonction de corrélation $F(j)$ [BLACKWELL *et al*, 1959] et la fonction de structure $S(j)$ [TATARSKI, 1961].

$$F(j) = \frac{\sum_{k=1}^{k=N-j} (I_k - M)(I_{k+j} - M)}{\sum_{k=1}^{k=N-j} (I_k - M)^2}$$

$$S(j) = \frac{\sum_{k=1}^{k=N-j} (I_k - I_{k+j})^2}{\sum_{k=1}^{k=N-j} I_k^2}$$

Où I_k représente l'intensité lumineuse de chacun des N points mesurés, qui a impressionné le film au point K, et I_{k+j}, l'intensité au point J, distant de K de la distance j, et où

$$M = \frac{\sum_{k=1}^{k=N} I_k}{N}$$

Ces fonctions ont toutes deux un dénominateur qui a pour but de les normaliser, de manière à pouvoir les comparer entre elles, et les calculer à partir des différents passages microdensitométriques. En effet, le noircissement moyen du cliché n'est pas uniforme. Ceci est dû, d'une part à la lumière parasite, d'autre part à l'assombrissement centre-bord (BLAMONT et BONNET, [1966]).

On peut remarquer que les $F(j)$ et les $S(j)$ sont reliés l'un à l'autre. En effet, si l'on prend les fonctions sans dénominateur

$$F'(j) = \overline{(I_k - M)(I_{k+j} - M)}$$

et

$$S'(j) = \overline{(I_k - I_{k+j})^2}$$

et si l'on suppose que ces fonctions aléatoires sont stationnaires, et qu'elles sont calculées à partir d'un nombre infini de points N, on peut écrire la relation

$$F'(j) = \frac{1}{2} S'(j = \infty) - \frac{1}{2} S'(j),$$ [TATARSKI, 1961],

$S'(j=\infty)$ étant la valeur que prend la fonction $S'(j)$ quand j tend vers l'infini. Dans notre cas particulier, le nombre de points N étant nécessairement fini, ces fonctions perdront leur signification quand j augmentant, $N-j$ deviendra faible, et la statistique se fera sur un trop petit nombre de points. Nous aurons néanmoins une assez bonne approximation de $S'(j=\infty)$ en prenant la valeur moyenne de $S'(j)$ pour les valeurs de j supérieures à la distance maximum de corrélation. Cette distance maximum de corrélation est la distance j à laquelle $F(j)$ cessant de décroître atteindra la valeur 0 et où $S(j)$ cessant de croître, atteindra la valeur $S(j=\infty)$.

En résumé, étant donné les définitions de nos fonctions, toutes les informations comprises dans la fonction de corrélation seront contenues dans la fonction de structure. La valeur de $S(j=\infty)$ est très utile puisqu'elle nous permettra de mesurer l'écart quadratique moyen de la brillance du Soleil.

Influence du grain du film.

Les dimensions que nous voulons analyser sur le Soleil étant représentées sur le film par des dimensions très faibles (1″=40 μ), la granulation du film interviendra dans une proportion non négligeable dans les fluctuations observées sur la trace du densitomètre. Il convient donc de mesurer la part du grain du film sur le cliché observé.

Considérons la fonction de structure du cliché $S'(j)=\overline{(I_k - I_{k+j})^2}$.

I_k peut être considéré comme la somme de deux termes : l'un I_{k_1} correspondant à l'intensité provenant du Soleil, l'autre I_{k_2} terme algébrique correspondant à l'effet du grain du film exprimé en intensité $\overline{(I_{k_2}=0)}$.

$$I_k = I_{k_1} + I_{k_2}$$

Appelant $S_s(j)$ la fonction de structure de l'intensité solaire

$$S_s'(j) = \overline{(I_{k_1} - I_{(k+j)_1})^2}$$

et $S_g(j)$ la fonction de structure du grain du film

$$S_g'(j) = \overline{(I_{k_2} - I_{(k+j)_2})^2}$$

on obtient la relation $S_s'(j)=S'(j)-S_g'(j)$.

Pour calculer $S_g(j)$, nous avons exposé uniformément le même film, à la même longueur d'onde, de façon à obtenir un même noircissement moyen (d=0,8), après un développement identique à celui du cliché. Comme pour le cliché à étudier, calculons la fonction de structure à partir de densitogrammes effectués avec un spot analyseur de mêmes dimensions. Nous aurons ainsi obtenu $S_g(j)$ et pourrons ainsi en déduire $S_s(j)$. En effet, les I_k étant les mêmes pour les trois membres, l'égalité en $S'(j)$ entraîne l'égalité en $S(j)$.

Le cliché uniformément éclairé a été obtenu en plaçant l'appareil photographique, ainsi que les filtres interférentiels, à 1 m de l'arc d'une lampe à xénon haute pression, de 900 Watts. L'avantage de ce dispositif réside dans le fait que les inhomogénéités de transmission des filtres, si elles sont décelables, interviendront dans $S_g(j)$.

II-2. *Mesures.*

Lors d'une première série de mesures [BLAMONT et CARPENTIER, 1967], nous avions fait huit enregistrements de 2,5 mm de longueur sur le cliché (63″ sur le Soleil).

Afin de diminuer le bruit sur les courbes, il est nécessaire d'utiliser un plus grand nombre de points pour chaque enregistrement densitométrique. Il est par ailleurs intéressant d'étudier la variation de $S_s(j)$ lorsque l'on s'approche du bord solaire. Les balayages densitométriques seront donc plus longs. Il n'est guère possible de les faire plus de deux fois plus longs (2′ 5″ sur le Soleil, soit 5 mm sur le film) afin, d'une part, de rester dans le champ de pleine lumière, d'autre part afin que le balayage (qui est rectiligne sur notre appareil) puisse être assimilé à un cercle parallèle au bord solaire, en particulier lorsque l'on s'approche de celui-ci. Les enregistrements seront également plus nombreux. En effet, avec une « fente » d'analyse de 20×40 μ sur le cliché (même fente que pour les premières mesures) nous ferons 21 balayages parallèles au bord, distants entre eux de 1/3 de mm sur le cliché (8″). Avec la même fente, nous ferons 4 balayages sur le cliché uniformément exposé. Afin de mener à bien le calcul de la

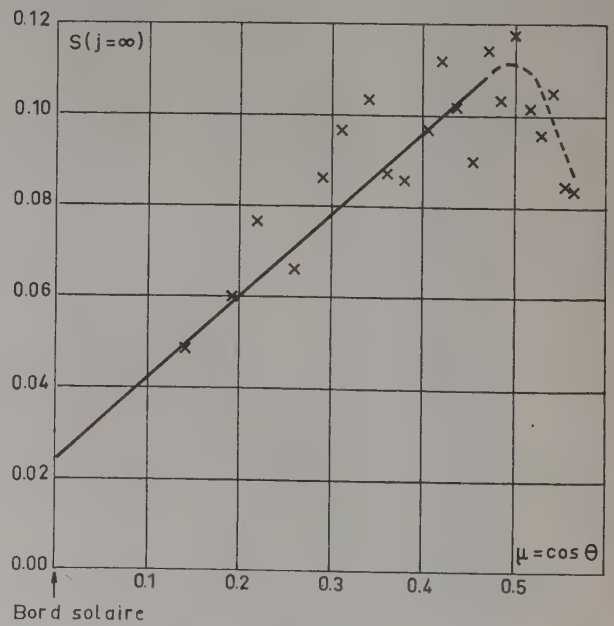

FIG. 6
Contraste en fonction de la distance au bord solaire.
Contrast vs. distance to the solar limb.

fonction de structure d'un tel nombre de balayages, nous avons été amenés à modifier notre densitomètre pour obtenir les densités automatiquement.

Pour chaque enregistrement de 500 points, nous avons ainsi obtenu les valeurs de $S(j)$ pour les valeurs de j comprises entre 0 et 25″, et la valeur moyenne de $S(j)$ pour $8'' < j < 25''$ destinée à représenter $S(j=\infty)$

II-3. *Résultats de ces nouveaux enregistrements.*

La figure 6 représente la courbe $S(j=\infty)$ en fonction de $\mu = \cos\theta$ distance au bord sur le Soleil. La dispersion des résultats est très grande mais il semble que $S(j=\infty)=f(\mu)$ puisse être assimilée à une fonction linéaire. La valeur que prend $S(j=\infty)$ quand μ tend vers 0 est très imprécise par suite de cette dispersion, mais aussi parce que, comme les enregistrements rectilignes, « parallèles au bord » ont une longueur de 2′, la définition de μ n'a plus beaucoup de signification quand μ est de l'ordre de 0,1. Les valeurs obtenues pour $\mu < 0{,}5$ sont altérées par l'œil de chat du bord du champ qui diaphragmant la pupille augmente le rayon de la tache de diffraction.

Sur la figure 7, nous avons tracé en trait plein les résultats de $S(j)$, en faisant la moyenne des valeurs obtenues sur les 15 enregistrements compris entre $\mu=0{,}34$ et $\mu=0{,}57$; en pointillé les résultats de $S_g(j)$ en faisant la moyenne des quatre enregistrements faits sur le cliché uniformément exposé. Sur la figure 8, nous avons la courbe $S_s(j)$ obtenue par soustraction de $S_g(j)$ à $S(j)$.

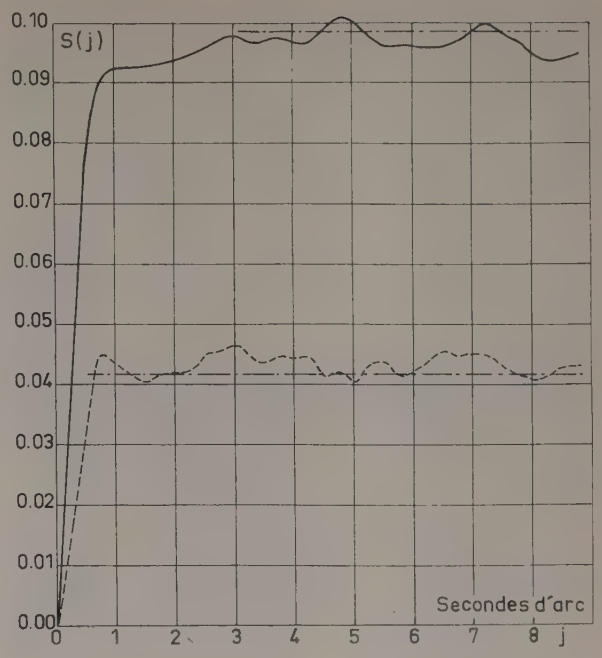

FIG. 7

Fonction de structure des enregistrements de 500 points en trait plein : moyenne de 15 enregistrements sur la photographie du Soleil ; en pointillé, moyenne des 4 enregistrements sur la photographie uniformément éclairée.

Structure functions for the recordings made at 500 points solid line : average of 15 recordings on the sun image, dashed line : average of 4 recordings on the uniformly exposed plate.

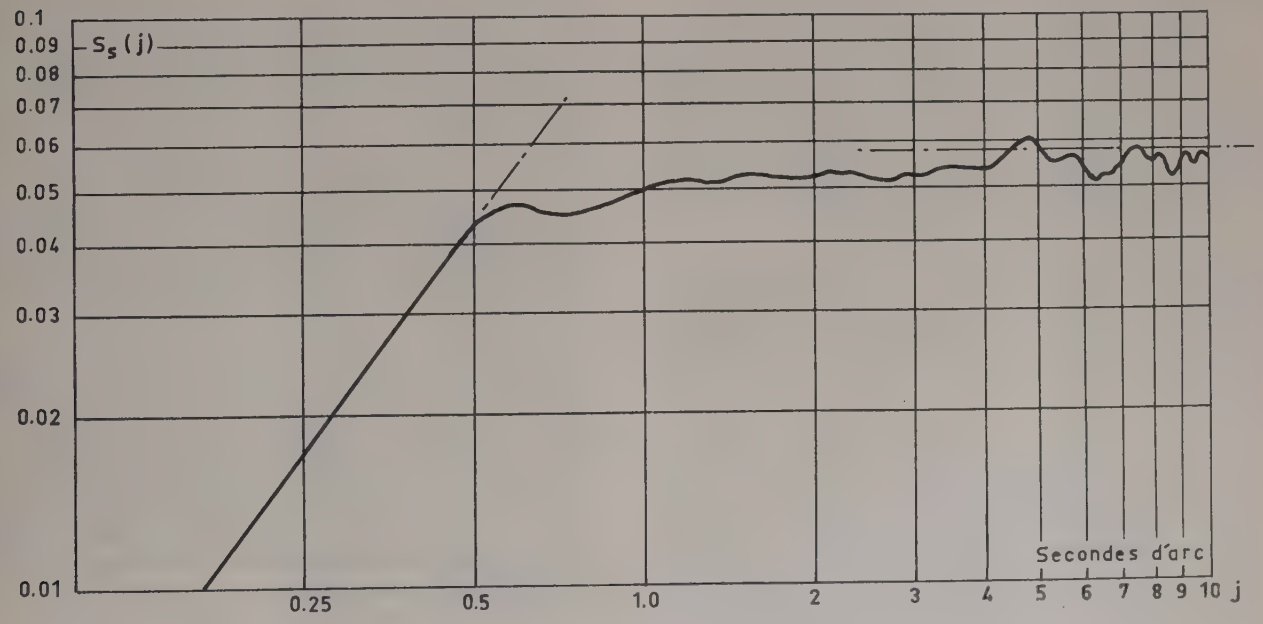

FIG. 8

Fonction de structure expérimentale du Soleil lui-même (moyenne des 15 enregistrements de 500 points).
Experimental structure function of the sun itself (average of the 15 recordings made at 500 points/line).

A l'examen de cette figure, il apparaît que, pour $j < 0{,}5''$ $S_s(j)$ est linéaire, et de pente 1, ce qui est parfaitement logique, ceci étant dû à la fente exploratrice de 0,5″ de largeur. Au-delà de $j=3''$ ou 4″, $S(j)$ est une droite de pente nulle, ce qui prouve qu'au-delà de 3″ à 4″ il n'y a plus de corrélation.

$S_s(j=\infty)=0{,}057$ qui est égal à $\frac{\overline{\Delta I^2}}{\overline{I^2}}$ représente le carré de l'écart quadratique moyen des brillances sur le Soleil.

Nous avons préféré tracer les fonctions de structure plutôt que les fonctions d'autocorrélation. En effet, la transmission de l'instrument n'étant pas uniforme dans tout le champ, la fonction de structure élimine partiellement cet effet sur les résultats de notre statistique.

II-4. *Écarts en température.*

Dans les mêmes conditions que dans le paragraphe I-4, le contraste des granules peut être traduit en différence de température. L'écart quadratique moyen relatif des brillances $\sqrt{\frac{\overline{\Delta I^2}}{\overline{I^2}}}$ est de $\sqrt{0{,}057}=0{,}24$. Grâce au grand nombre de mesures que nous avons faites, nous estimons que l'erreur que nous avons pu commettre sur la mesure de $S_s(j=\infty)$ est inférieure à 0,01.

Pour une température moyenne de 4500° K, nous pourrons ainsi calculer que l'écart quadratique moyen des températures obtenu avec la résolution de notre cliché est de $60° K \pm 5° K$.

II-5. *Discussion sur la granularité du film*

La granularité du film utilisé (103 a O U-V) n'est pas suffisante pour pouvoir voir chaque grain du Soleil individuellement. BRANDT [1967] donne des valeurs numériques de la plus petite dimension détectable individuellement a*, en fonction du contraste des granules avec le film 103 a G.

Étant donné la focale de notre télescope et le contraste des granules que nous avons mesuré, nous pouvons admettre que nous aurions « vu » chaque granule du Soleil, avec un rapport signal sur bruit de 2 si la distance entre les granules avait été de 2,75″.

Il peut paraître étonnant d'obtenir, dans ces conditions, des renseignements sur la distance maximum de corrélation (celle-ci serait inférieure à la moitié de la distance de deux granules dans le cas d'une répartition de granules identiques). Mais il ne faut pas oublier que nos balayages photométriques ont une longueur de 2′, et que donc nous faisons une statistique sur 60 granules (supposés distants de 2″). La précision de mesure est donc meilleure que celle que l'on peut obtenir avec un granule pris individuellement.

CONCLUSION

Le choix d'une distance focale équivalente du télescope de 8 mètres est un compromis raisonnable entre la place disponible à bord de notre nacelle et un champ angulaire assez grand. Malheureusement, l'état actuel des techniques nécessite l'emploi de filtres optiques dont le maximum de transmission n'est que de 3 %. Il est alors nécessaire d'utiliser un film sensible mais à grains relativement gros. La qualité des données qu'il est ainsi possible d'obtenir sur des dimensions de film inférieures à 40 μ devient très discutable et la résolution pourra difficilement dépasser 1 seconde d'arc.

Nous n'avons étudié qu'une seule photographie. Sa qualité n'est pas suffisante pour nous avoir permis de mettre en évidence les grains individuellement d'une façon directe. C'est grâce à une statistique sur de nombreux granules que nous avons des résultats sur les dimensions et le contraste de ceux-ci.

Les faibles écarts de température mesurés sur les granules, peut-être minimisés par une résolution insuffisante, semblent néanmoins représentatifs d'une couche à gradient de température faible. La granulation de la photosphère, avec ses écarts de température plus importants, semble s'estomper.

L'existence de microfacules semble le phénomène le plus caractéristique que nous ayons observé. Nous avons pu en observer de passablement brillants, et de relativement grandes dimensions, mais il est possible d'imaginer qu'il en existe de moins brillants et de plus petites dimensions qui se confondent avec les granules.

En résumé, ce travail nous a permis de prouver :

1° Qu'il était possible à 30 000 m d'altitude en ballon de photographier le Soleil à 2000 Å avec un temps de pose de 1/4 de seconde et une ouverture relative de f/40.

2° De déceler dans les très hautes couches de la photosphère l'existence de microfacules d'une durée de vie supérieure à la demi-heure dont la dimension est de l'ordre de 5″ et dont les plus brillantes que nous ayons observées ont une température supérieure de $300 \pm 100° K$ à la température moyenne.

3° De constater à 2000 Å que la granulation photosphérique est encore décelable avec des dimensions de granules comparables à celles des granules observés dans le domaine visible, et qu'elle correspond sur notre cliché à un écart quadratique moyen des températures des couches observées de $60 \pm 5° K$ déterminé à partir de la valeur de 0,24 de l'écart quadratique moyen des fluctuations de brillance du Soleil que nous avons mesuré.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre reconnaissance à J. Texereau qui a conçu, calculé et fait réaliser l'optique du

télescope, ainsi qu'à tous les chercheurs et ingénieurs du Service d'Aéronomie du Centre National de la Recherche Scientifique et parmi ceux-ci, spécialement à MM. J. Barat, R. M. Bonnet, Ph. Lemaire, M. Hersé, J. M. Luton, Ph. Gildwarg et M. Burello pour leur aide efficace et amicale.

Nous remercions le Centre National d'Études Spatiales qui nous a proposé l'utilisation de la nacelle CdC lors de vols technologiques.

Manuscrit reçu le 7 mars 1968.

RÉFÉRENCES

Bizouard B., Godin P., Raoult J.-C., 1965, *Science et Industrie Spatiale*, 3 et 4.

Bizouard B., Godin P., Raoult J.-C., 1966, Communication au 17e Congrès de la F.I.A. Madrid.

Brewer A., Wilson A., oct. 1965, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 91, n° 390 452.

Vigroux E., Migeotte M., Vermande P., 1965, *Ann. Géophys.*, **21**, 500.

Carver J. H. and Horton B. H., Burger F. G., 1 sept. 1966, *J.G.R.*, Letters to the Editor, **71**, 4189.

Fowler W. K., Rense W. A. and Simmons W. R., déc. 1965, *Applied Optics*, **4**, 1596.

Blackwell D. E., Dewhirst D. W. and Dolfuss A., 1959, *Monthly Not. Roy. Astron Soc.*, **119**, 98.

Tatarski V. I., 1961, *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill Book Co.

Blamont J.-E., Bonnet R.-M., C.R., 1966, **262**, 152.

Blamont J.-E., Carpentier G., mars 1967, *Solar Physics*, **2**, 180.

Brandt P. N., 1967, *Solar Physics*, 2, 211.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

RECONNAISSANCE DES FORMES

Vu et approuvé :

Paris, le 15 mars 1968

Le doyen de la Faculté des Sciences,

Marc ZAMANSKY

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean ROCHE